

主星带编队小卫星顺轨干涉 GMTI 及性能分析

杨凤凤 梁甸农 刘建平 孙造宇
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 该文针对主星带编队小卫星雷达系统,讨论了基于修正的顺轨干涉(ATI)原理进行地面动目标检测方法及其性能。利用小面单元模型仿真了一幅带动目标的地面起伏场景图像,验证了该方法的有效性。综合盲速、最小可检测速度、测速误差等指标,给出了适合执行ATI功能的编队构形部分参数,可为编队小卫星GMTI相对绕飞轨道设计提供一定指导。最后,对CartWheel和Pendulum两种典型系统构形进行了GMTI性能仿真分析。

关键词 编队小卫星,顺轨干涉,地面动目标检测

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1573-04

ATI-GMTI of Spaceborne Parasitic Radar System

Yang Feng-feng Liang Dian-nong Liu Jian-ping Sun Zao-yu

(Dept of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, the ground moving target indication based on modified along-track interferometry of spaceborne parasitic radar system is analyzed. The imaging simulation of a piece of fluctuant terrain with a moving target verifies the validity. The appropriate formation fling parameters are presented when considering some performance metrics, such as the blind velocity, the minimum detectable velocity and the velocity precision. Some conclusions are serviceable of orbital design. Finally, GMTI performance of two typical systems, Cartwheel and Pendulum, is analyzed through computer simulation.

Key words Satellite cluster, Along track interferometry, GMTI

1 引言

主星带伴随小卫星编队系统是目前国外提出的一类新的SAR系统,通常,考虑辅星入轨偏差要求以及减小主星发射信号对辅星的直接干扰,主辅星之间保持约50~100km的距离^[1]。由于这类系统具有多功能、生存力和抗干扰能力强、周期短、成本低等优点,正成为国内外关注的热点, CartWheel^[2]和Pendulum^[3]是这类系统的典型代表。

顺轨干涉(ATI)是实现该类系统地面动目标检测的一种主要手段。经典ATI原理^[4]利用运动目标在两颗近距离沿航向编队飞行的小卫星雷达图像中的相位差异,检测地面动目标,其基本假设条件是,两颗小卫星星下点轨迹近似重合,静止目标在前后两幅图像中的相位相同。目前多数国内外文献^[5]均在该假设条件下,讨论密集编队的多发多收或一发多收小卫星群ATI方法及性能。而实际上,当主辅星之间的距离达到50~100km时,用于干涉的两幅图像各自对应的小卫星空间位置不重合,导致静止目标的干涉相位不为零,此时,需要对经典ATI方法进行适当修正。

本文分析了目标运动对星载双站SAR图像的影响,利用小面单元模型和乘性噪声模型仿真了一幅带有动目标的地形起伏SAR图像,验证了修正ATI方法的有效性。结合盲速、最小可检测速度、相对/绝对测速误差与编队构形参数

的关系,给出了适合执行ATI任务的部分编队构形参数范围,得出一些有用的结论。最后,对CartWheel和Pendulum两种典型系统进行了仿真分析,验证两种构形的GMTI能力。

2 修正ATI-GMTI

2.1 修正ATI方法

主星带编队小卫星雷达系统观测几何如图1所示,为简化数学分析,假设参考辅星 S_1 沿主星 M 航向飞行, x 轴由地心指向 S_1 , y 轴沿主辅卫星共同的速度 V_s 方向, z 轴符合右手螺旋准则, V_s 合成了地球自转的影响。卫星空间位置

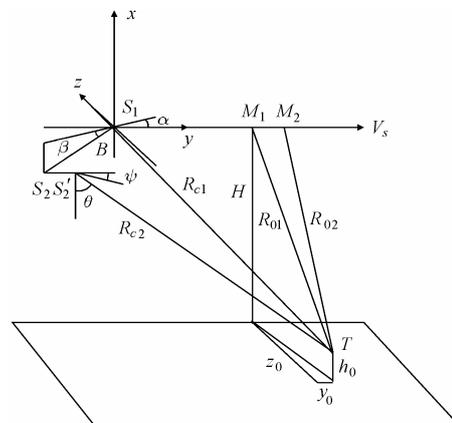


图1 主星带编队小卫星雷达系统观测几何
Fig.1 Spaceborne parasitic radar system geometry

$M_1 = M(t)$, $M_2 = M(t + \Delta t)$, $S_1 = S_1(t)$, $S_2 = S_2(t)$, $S'_2 = S_2(t + \Delta t)$, 主星高度 H 。 M_1, S_1 和 M_2, S'_2 分别构成双站 SAR 成像关系并形成干涉, 其中延迟时间 Δt 保证两对双站 SAR 具有相同的回波多普勒^[2]。方位时间 $t = t_0$ 时卫星过目标 $T(-H + h_0, Y + y_0, z_0)$ 的合成孔径中心, Y 表示 M_1, S_1 连线距离, $R_{01}, R_{c1}, R_{02}, R_{c2}$ 分别是目标到 M_1, S_1, M_2, S'_2 的距离。以水平角 α , 高低角 β 描述该时刻辅星 S_1, S_2 空间基线 B 的姿态, $|B| \ll |R|$ 。以 $f_{d1}, f_{d2}, f_{r1}, f_{r2}$ 分别表示两对双站 SAR 的瞬时多普勒频率和调频率, 则 $f_{d1}(t) = f_{d2}(t + \Delta t) = f_{d2}(t) + f_{r2}\Delta t$, 根据文献[6]给出的计算方法能够由卫星轨道根数和雷达方位角参数准确计算 Δt , 通常 Δt 在一个合成孔径时间里为常数 ($f_{r1} \approx f_{r2} \approx f_r$)。当主星 M_1 正侧视 $y_0 = 0$, 可以 $D \approx B \cos \beta \cos \alpha \sqrt{\left[\left(\sqrt{R_{01}^2 + Y^2} / R_{01} \right) + 1 \right]}$ 近似计算 Δt 的大小, $D = V_s \Delta t$ 。显然双站体制下, 由于主辅星的位置分离, 地杂波干涉相位不为零, 若期望以 ATI 方法顺利检测到动目标, 则需结合先验地面高程信息补偿地杂波相位。对 ATI 方法来说, 以相同的方位匹配滤波器参数得到两幅用于干涉的 SAR 图像是一个很重要的概念, 因此方位向预滤波在 ATI 处理中必不可少。如果我们以 M_1, S_1 的多普勒中心 f_{d10} 方位压缩成像, 则显然地杂波的干涉相位既与目标到主星的距离 R_0 有关, 又与到辅星的距离 R_c 有关, 这给地杂波相位补偿及后续性能分析带来诸多不便。但可以调整多普勒中心至 $f_{d10} - f_r \Delta t / 2$, 则 R_{01}, R_{02} 关于目标对称, 对地杂波干涉相位无贡献^[7]。

令 $\varphi_{21} = 2\pi(R_{c2} - R_{c1}) / \lambda$ 表示某点目标的干涉相位。辅星接收下视角为 θ , 方位角为 ψ ,

$$\varphi'_{21} = \varphi_{21} + 2\pi(B \sin \beta \cos \theta - B \cos \beta \sin \theta \cos(\alpha + \psi) + D \sin \theta \cos \psi) / \lambda \quad (1)$$

表示补偿地杂波干涉相位之后的值, 文献[8]的研究表明其统计特性与地表类型无关, 在地形起伏或地面散射特性变化不过于激烈的情况下, 具有如下的零均值概率密度函数:

$$f_{\varphi'}(\varphi'_{21}) = \frac{\Gamma(n+1/2)(1-\rho^2)^n \rho \cos(\varphi'_{21})}{2\sqrt{\pi}\Gamma(n)(1-\rho^2 \cos^2(\varphi'_{21}))^{(n+1/2)}} + \frac{(1-\rho^2)^n}{2\pi} {}_2F_1(n, 1/2; \rho^2 \cos^2(\varphi'_{21})) \quad (2)$$

n 为视数, ρ 为两幅图像的相关系数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, ${}_2F_1(a; b; c; y)$ 为高斯超几何函数。文献[7]中所给的概率密度函数是上式在 $n=1$ 时的特例。

对运动目标, 定义双站角平分线方向为有效视线方向, 目标沿该方向的速度 v_r , 则有 $\varphi'_{21} = 4\pi v_r \Delta t / \lambda$ 即

$$v_r = V_s \lambda \varphi'_{21} / (4\pi D) \quad (3)$$

故可根据式(2)设计适当的 CFAR 相位检测门限 η 判别动目标, 相应最小可检测速度 $MDV = V_s \lambda \eta / (4\pi D)$ 。 D 是基线姿态角 α, β 的函数, 下文将在 3.1 节分析 MDV 和测速误差与 α, β 的联系。

2.2 目标运动的影响

与机载 SAR 成像不同的是, 地面运动目标相对星载平台的运动速度很小, 对调频率几乎没有影响, 不存在距离污染或者方位散焦的问题, 只是因目标径向速度的存在使其方位多普勒中心偏离地杂波, 偏移量 $\Delta f_d = 2v_r / \lambda$ 。众所周知, 多普勒中心频率估计误差造成目标图像位置的偏移, 以 f_{dc}, f_{dr} 分别代表地杂波、动目标方位多普勒中心, 根据 RD 或者 CS 成像算法推导过程可以得出运动目标在 SAR 图像上距离和方位位置的偏移大小分别为

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{f_{dr}}{f_r} \frac{2v_r}{\lambda} - \frac{(2v_r / \lambda)^2}{2f_r} \right] \quad (4)$$

$$\Delta y_0 = -2V_g v_r / (\lambda f_r) \quad (5)$$

V_g 表示 V_s 在地球表面的大小。由于双站 SAR 多普勒参数 f_r 与单站参数 f_r 的差异, 方位偏移量的大小不能简化为通常所写的 $v_r R_0 / V_g$ 形式, 这关系到目标定位的准确性。

2.3 仿真实验

为了说明上述方法的正确性, 本文利用小面单元模型和乘性噪声模型仿真了范围 $285\text{m} \times 837\text{m}$, 分辨力 $2.5\text{m} \times 5.0\text{m}$ (距离 \times 方位) 的星载双站 SAR 图像如图 2(a)。主辅卫星采用完全顺轨的编队方式, 轨道半径 7159km , 偏心率 0.001165 , 轨道倾角 98.549387° , 观测带纬度 30° 。主星方位角 90° , 下视角 30° , 波长 0.03m , $Y=100\text{km}$, $B=120\text{m}$, $\alpha=\beta=0$, $\Delta t=7.926\text{ms}$ 。场景中心有一座高 34m , 半径 131m 的圆锥状山丘。运动目标实际位于图中三角形标注位置, 高度 0m , 沿纬度圈旋转角速度 $1.0\text{e-}6\text{rad/s}$, 等效径向速度 3.0m/s , 成像显示于圆圈处, 距离、方位分别偏离真实位置 33m , 380m , 信杂比 10dB ,

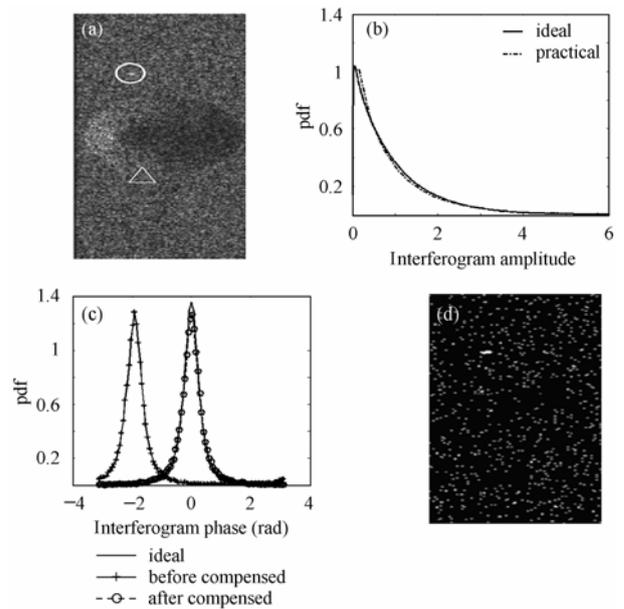


图2 双站 ATI-GMTI 仿真结果
 (a) SAR 图像 (b) 干涉幅度 pdf (c) 干涉相位 pdf (d) 检测结果
 Fig.2 Bistatic ATI-GMTI simulation results
 (a) SAR image (b) Interferogram amplitude pdf
 (c) Interferogram phase pdf (d) Indication result

杂噪比 11.7dB, 相关系数 0.937。图 2(b)是理论和实际的归一化干涉幅度 pdf。地杂波干涉条纹疏密程度与接收下视角 θ 的变化范围和干涉基线 B 的长短有关(式(1)), 在 B 较短、场景范围不大、地形起伏较缓的条件下, 干涉相位的分布比较集中, 如图 2(c), 可以采取统一的均值补偿, 这样简化补偿过程。补偿之后的干涉相位 pdf 与式(2)表示的理论值相差不大, 不影响动目标检测的虚警概率。若干涉相位分布分散以至与理论 pdf 相差较大, 则需分块处理。图 2(d)是相位门限 0.5rad, 归一化幅度门限 0.5 的检测结果, 虚警概率 0.035。

3 性能分析

3.1 基线姿态的影响

忽略地杂波对干涉相位的影响, 假设两幅单视SAR复图像相关系数 $\rho = 0.983$, 虚警概率 0.05, 由式(2)算得相位检测门限 $\eta = 0.6$ rad(上文幅相二维联合检测是为了进一步降低虚警概率, 此处没有考虑幅度门限检测)。图 3 是MDV随基线姿态角变化关系。为保证地面速度 10m/s以内的运动目标无速度模糊, 基线 $B = 180$ m, 平台速度 $V_s = 7547.8$ m/s, 主星正侧视, 波长 0.24m, PRF=2kHz。当 $|(\alpha, \beta) \pm i \cdot 180^\circ| < 15^\circ$ ($i = 0, 1, 2$)时可以检测到地面速度小于 2m/s 的运动目标, 空白区域不利于检测慢速目标。

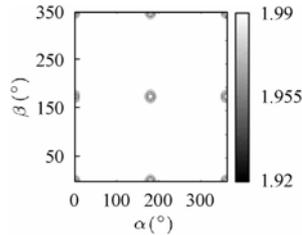


图3 MDV与基线姿态角

Fig.3 MDV and α, β

对绝对测速误差起主要作用的是基线方位/高低姿态角和目标高程。定义相对测速误差 $|\sigma_{v_r} / v_{r,max}|$, $v_{r,max} = V_s \lambda / (4D)$ 为最大无模糊速度, 即盲速, 图 4 是相对/绝对测速误差随基线姿态角的变化关系, 误差参数见表 1, 具体原由参见文献[5,7]。虽然在空间范围内, 相对测速误差最大不超过 0.1680, 但是, 绝对测速误差随着垂直航向到基线分量的增加而迅速增大。当 $|(\alpha, \beta) \pm i \cdot 180^\circ| > 30^\circ$ ($i = 0, 1, 2$)对应右图空白区域, 绝对测速误差大于 1m/s, 相应方位定位误差超过 139m。

表1 误差值

Tab.1 Errors

σ_{V_s}	10m/s	σ_{R_0}	10m
$\sigma_{\varphi_{12}}$	0.2rad	σ_{ψ}	10"
σ_B	5mm	σ_r	10m
σ_α	10"	σ_{R_c}	0.3m
σ_β	10"		

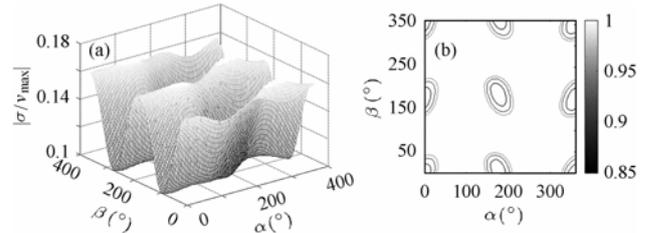


图4 相对/绝对测速误差与基线姿态角

(a) 相对测速误差 (b) 绝对测速误差

Fig.4 Relative/absolute velocity error and α, β

(a) Relative velocity error (b) Absolute velocity error

3.2 Cartwheel 和 Pendulum 能力分析

假设椭圆半短轴 300m, 图 5 是 Cartwheel 构形一个轨道周期内的 GMTI 能力。随着平近点角的变化, 基线长度和姿态角在不断改变, 图 5(a)显示了 3 个干涉对的盲速(实线)和 MDV(虚线)周期变化情况, 介于某个干涉对实线和虚线之间的区域表示该干涉对的可检测速度范围。图 5(b)显示了这 3 个干涉对的绝对测速误差周期变化的情况, 对于每个干涉对而言, 一个轨道周期内都有 2 个误差极大区域, 6 个误差极大区域相互错开。这样, 结合图 5(a), 图 5(b)及第 3.1 节讨论结果, 如果某时刻某个运动目标同时被多个干涉对检测到, 则应取该时刻水平基线较长、垂直基线较短的干涉对。

假设 Pendulum 3 个干涉对沿航向间隔 150m, 350m, 500m, 垂直航向振幅 100m, 图 6 是 Pendulum 构形一个轨道

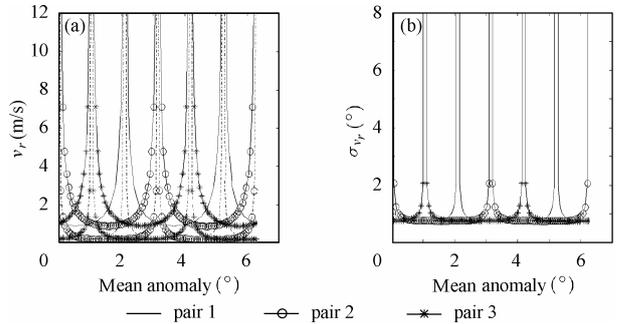


图5 Cartwheel GMTI 能力示意图

(a) 有效速度范围 (b) 测速误差

Fig.5 Cartwheel GMTI ability

(a) Valid velocity range (b) Velocity error

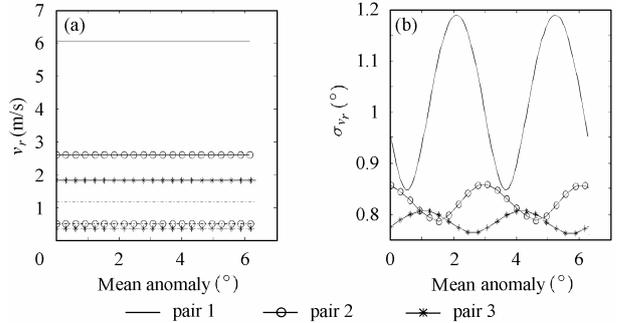


图6 Pendulum GMTI 能力示意图

(a) 有效速度范围 (b) 测速误差

Fig.6 Pendulum GMTI ability

(a) Valid velocity range (b) Velocity error

周期内的 GMTI 能力。同样,图 6(a)中界于某个干涉对实线和虚线之间的区域表示该干涉对的可检测动目标速度范围。图 6(b)显示了这 3 个干涉对的绝对测速误差。比较图 5,图 6 可以发现, Pendulum 在 GMTI 功能上具有明显优势。

4 结束语

本文讨论了基于修正 ATI 方法的主星带编队小卫星雷达系统 GMTI 及其性能,通过仿真一幅带动目标的地形起伏双站 SAR 图像验证了该方法的有效性。在信杂比足够大、地杂波干涉相位补偿准确的前提下,仿真分析了编队构形对 GMTI 能力包括盲速、MDV 及测速误差的影响。实验表明,基线姿态越接近顺轨,越有利于检测地面慢速目标。以 L 波段空间基线 180m 为例,假设虚警概率 0.05,两幅单视 SAR 复图像相关系数 0.983,相位检测门限 0.6rad,当基线方位、高低姿态角超过 15° 时不利于慢速目标的检测,超过 30° 测速及定位误差较大。基线长度或相位检测门限变化时上述结论应适当调整。需要特别指出的是,由于主星与接收辅星的位置分离,即便完全顺轨构形,地杂波干涉相位也不为零,需预先补偿。由于高程误差和基线姿态误差的影响,收发分置形式下,GMTI 测速和定位误差较大,进一步提高测速、定位精度困难。同时,为了保证小卫星飞行安全,基线不小于 100m,盲速现象严重,这是利用 ATI 进行 GMTI 的固有缺陷。

参 考 文 献

- [1] 陈筠力. 单发多收分布式 SAR 卫星系统初步概念研究. 分布式航天器新概念及其应用技术研讨会. 北京, 2004, 10: 308-314.
- [2] Massonnet D. The interferometric cartwheel: A constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2413-2430.
- [3] Fiedler H, Krieger G, Jochim F, Kirschner M, Moreira A. Analysis of bistatic configurations for spaceborne SAR interferometry. EUSAR Cologne, Germany, 2002: 29-33.
- [4] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Nature*, 1987, 328(20): 707-709.
- [5] Moccia A. Spaceborne Along-track SAR interferometry: Performance analysis and mission scenarios. *IEEE Trans. on AES*, 2001, 37(1): 199-213.
- [6] 何峰, 梁甸农, 刘建平. 星载寄生式 SAR 多普勒特性分析. 信号处理, 2004, 20(5): 475-480.
- [7] 刘建平, 梁甸农, 何峰. 主星带伴随小卫星编队系统的顺轨干涉 SAR 性能研究. 电子与信息学报, 2004, 26(增): 500-506
- [8] Gierull C H. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 691-701.
- 杨凤凤: 女, 1978 年生, 博士生, 研究方向为星载合成孔径雷达、地面动目标检测等.
- 梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达系统理论、分布式小卫星雷达系统理论和自适应信号处理、谱估计等研究工作.
- 刘建平: 男, 1976 年生, 博士, 主要研究方向为分布式小卫星雷达系统.
- 孙造宇: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为分布式星载合成孔径雷达成像, 地面高程测量等.
- [1] 陈筠力. 单发多收分布式 SAR 卫星系统初步概念研究. 分布